

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství

Katedra materiálového inženýrství



STUDIUM TEPELNÝCH VLASTNOSTÍ SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

STUDY OF THERMAL PROPERTIES OF SANDWICH STRUCTURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

Adam Bartoník

VEDOUCÍ PRÁCE

prof. RNDr. Pavol Košťál, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Adam Bartoník**
Studijní program: B3923 Materiálové inženýrství
Studijní obor: 3911R028 Diagnostika materiálů
Téma: Studium tepelných vlastností sendvičových struktur
Study of thermal properties of sandwich structures

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Rešerše problematiky

Popis metodik měření tepelných vlastností

Analýza a vyhodnocení výsledků

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1]Korínek, Z.: Kompozity – skriptum, <http://www.volny.cz/zkorinek>.
- [2]Ehrenstein, G., W., : Polymerní kompozitní materiály, Scientia, Praha 2009.
- [3]Wanberg, J.: Composite materials, Wolfgang publication Inc., 2010


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

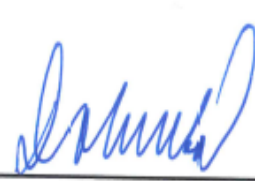
Vedoucí bakalářské práce: **prof. RNDr. Pavol Košťál, Ph.D.**

Datum zadání: 30.11.2015

Datum odevzdání: 20.05.2016




prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry


prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 6. Obsah BP |
| 2. Originál zadání BP | 7. Textová část BP |
| 3. Zásady pro vypracování BP | 8. Seznam použité literatury |
| 4. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 9. Přílohy |
| 5. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | |

ad 1) Titulní list je koncipován podle požadavků příslušné oborové katedry.

ad 2) Originál zadání BP obdrží student na oborové katedře.

ad 3) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za originálem zadání BP. („Zásady pro vypracování bakalářské práce“ jsou ke stažení na webových stránkách fakulty).

ad 4) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listu (ke stažení na webových stránkách fakulty) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 5) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listu česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 6) Obsah BP se uvádí na zvláštním listu. Zahrnuje názvy všech číslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 7) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). V případě, kdy zadání BP vychází ze spolupráce se subjekty mimo VŠB -TU Ostrava a řešení studenta, týkající se citlivých dat spolupracujícího subjektu, je zpracováno v samostatné zprávě, tak zveřejněná část BP bude zpracována v rozsahu min. 15 stran a celkový rozsah BP bude min. 25 stran.

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm, zarovnání do bloku.

Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 9). Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. Matematické vzorce musí být číslovány (v kulatých závorkách). U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 8) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků. Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 9) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

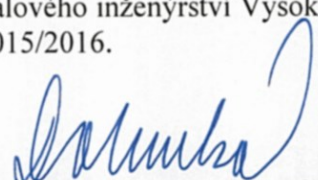
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě. Po vložení BP do IS EDISON bude provedena její kontrola na plagiátorství.

IV.

Nesplnění výše uvedených zásad pro vypracování bakalářské práce může být důvodem nepřijetí práce k obhajobě. O nepřijetí práce k obhajobě rozhoduje v tomto případě garant příslušného studijního oboru. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2015/2016.

Ostrava 2. 11. 2015


Prof. Ing. Jana Dobrovská, CSc.
děkanka Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на ведо́мí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на ведо́мí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 16.5.2016

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Poděkování

Tímto bych chtěl rád poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce panu prof. RNDr. Pavolu Košťalovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady, podněty a také za drahocenný čas a odborné vedení při tvorbě této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá studiem tepelných vlastností sendvičových struktur. Byla zkoumána měrná tepelná kapacita, teplotní vodivost a tepelná vodivost pěti různých vzorků. Teoretická část se zaměřuje na informace ohledně kompozitních materiálů, sendvičových materiálů a měření tepelných vlastností materiálu. Experimentální část se zabývá stanovením jednotlivých měřených veličin a hodnotí výsledky tepelných vlastností sendvičových struktur.

Abstract

This bachelor's thesis deals with the study of thermal properties of sandwich structures. Specific heat capacity, thermal conductivity and heat conductivity of five different samples were investigated. The theoretical part is focused on the information concerning composite materials, sandwich materials and measurement of thermal properties of the material. The experimental part deals with the determination of individual measured variables and evaluate the results of the thermal properties of sandwich structures.

Klíčová slova

sendvičová struktura; tepelné vlastnosti; měrná tepelná kapacita; teplotní vodivost; tepelná vodivost.

Keywords

sandwich structure; thermal properties; specific heat capacity; diffusivity; thermal conductivity.

Obsah

ÚVOD	1
TEORETICKÁ ČÁST	2
1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	2
1.1 Definice	2
1.2 Mikrokompozity.....	3
1.3 Makrokompozity	4
1.4 Nanokompozity	4
1.5 Vlákná	5
1.5.1 Definice	5
1.5.2 Skleněná a minerální vlákna.....	6
1.5.3 Uhlíková vlákna	7
1.5.4 Binární (multifázová) vlákna.....	8
1.5.5 Polykrystalická (keramická) vlákna	9
1.5.6 Kovová vlákna.....	10
1.5.7 Whiskery	10
1.5.8 Polymerní vlákna.....	11
1.6 Matrice	12
1.6.1 Definice	12
1.6.2 Kovové matrice	13
1.6.3 Keramické a skleněné matrice.....	13
1.6.4 Silikátové matrice.....	14
1.6.5 Polymerní matrice	14
1.7 Prepregy	15
2. SENDVIČOVÉ STRUKTURY	17
2.1 Koncepce a design.....	17
2.2 Jádra	18
2.3 Testování	20
2.4 Výroba.....	21
2.5 Spojení.....	22
2.6 Příprava povrchu	23

2.7	Postup aplikace.....	24
3.	SDÍLENÍ TEPLA.....	25
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST		27
4.	TEPELNÉ VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH STRUKTUR	27
4.1	Charakteristika dodaných vzorků.....	27
4.2	Měření tepelných vlastností	28
4.3	Výsledky měření	30
4.4	Závěr.....	31
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		32

ÚVOD

Vývoje v oblasti kompozitních materiálů od posledního čtvrtstoletí dělají tuto oblast populární vzhledem k šíři a univerzálnost využití. Meziroční tempo globálního růstu kompozitů je 5% - 6% z důvodu velkých pokroků v dopravním a leteckém průmyslu. Náklady na kompozity se stávají stále více konkurenčními. Během čtvrt století se cena vysoce výkonných kompozitů, používaných v leteckém průmyslu, snížila o více než polovinu kvůli sofistikovaným kovovým slitinám.

Povinnosti recyklovatelnosti, které udávají právní předpisy a normy, se týkají také kompozitních činností. To vede k významnému zvýšení výzkumu a vývoje zabývajícím se přírodními vlákny a biodegradovatelnými polymery.

Nárůst v používání kompozitů byl podporovaný vývojem moderních konstrukčních a výrobních metod průmyslových komponentů, které umožňují funkční optimalizaci, která je založena na několika technických a ekonomických kritériích. Dobrá znalost toho, co již existuje, pomáhá rozvíjet a používat spolehlivé numerické procesy pro chování v provozu, stejně jako k realizaci během výroby. Vývoj simulačních nástrojů je důležitou součástí průmyslového vývoje, nejvíce pak ve složených oblastech. Bez pokusu o nahrazení testování, tyto nástroje umožňují plné využití experimentálních výsledků v mnoha kompletních způsobech vytvářet silnou součinnost, která šetří čas a náklady.

Je možné s určitou nadsázkou také říci, že historie používání kompozitních materiálů je podobně stará jako lidstvo samo. Již při konstrukci nejstarších obydlí se používala hlína vyztužená slámou nebo rákosem, známým stavebním prvkem byly cihly vyztužené slámou. V té době se samozřejmě pro stanovení optimálního složení nepoužívaly propracované výpočetní metody. Vycházelo se z intuice a z praktických zkušeností.

Cíle této bakalářské práce jsou literární rešerše problematiky kompozitních a sendvičových struktur, popis metodik měření tepelných vlastností, analýza a vyhodnocení výsledků.

TEORETICKÁ ČÁST

1. KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

1.1 Definice

V současné době kompozitní materiály odkazují na materiály, které obsahují silné vlákna - spojitě nebo nespojitě, vložené ve slabším materiálu nebo v matrici. Matrice udržuje geometrické uspořádání vláken a přenáší na tato vlákna zatížení působící na kompozitní součásti. Výsledný kompozitní materiál je schopný meziprojektu mechanického výkonu, který je vyšší než matrice, ale nižší než vláknité výztuhy. Obecně tento materiál představuje také jiné další vlastnosti, které jsou specifické [1].

Během návrhu a výroby kompozitního materiálu má být vyvolán synergický účinek v jeho struktuře tak, aby bylo možno získat nový materiál s lepšími vlastnostmi, než mají vlastnosti jednotlivých složek samy nebo ve směsi [2].

Podle dnešního chápání musí být splněno několik podmínek, aby byl materiál zařazen jako kompozitní materiál:

- podíl výztuže musí být větší než 5%,
- vlastnosti výztuže a matrice (mechanické, fyzikální i chemické) se musí lišit, výztuž je výrazněji pevnější v tahu a může být tužší než matrice,
- kompozit musí být připraven smícháním složek [3].

V závěrečné fázi spočívá závislost pevnosti a tuhosti kompozitního materiálu na pevnosti a tuhosti použitých vláken. Mechanické vlastnosti kompozitu jsou ovlivněny použitými vlákny a jejich orientací. Jednotlivé složky výztuží jsou vybírány jednotlivě. Vyztužující vlákna z carbonu, skla nebo aramidu a matricí z termoplastu nebo termosetu, tvoří dobrou kombinaci pro základ kompozitu ve formě plastu. V mnoha případech se u vyztužených plastů požaduje zlepšení vyztužení ve směru namáhání. Výsledkem je tedy anizotropní materiál. To znamená, že jde o materiál, který vykazuje v rozdílných směrech různé vlastnosti [4].

Mezi vyztužené plasty se občas zařazují vstříkované plasty vyztužené krátkými vlákny, protože jejich technologie zpracování je podobná jako u nevyztužených plastů, ovlivňují nám pouze požadovanou anizotropii. Navíc téměř 80 % vyztužených plastů se skládá z kombinace dlouhých skleněných vláken a polyesterových či vinylesterových pryskyřic. Uplatnění na trhu tohoto materiálu však není tak valné, neboť přes všechny výhody má i několik nevýhod. Druh, tloušťka a orientace vláken mohou výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti jednotlivých vrstev kompozitu. Kvůli tomu je lepší v projekční fázi práce správně rozvrhnout složení a pořadí jednotlivých vrstev, neboť tímto složením jde ovlivnit jednotlivé vlastnosti kompozitu [4].

1.2 Mikrokompozity

Kompozitní materiály mohou obsahovat vyztužující fáze rozdílných rozměrů. V průmyslu mají největší význam mikrokompozitní materiály, u kterých největší příčné rozměry výztuže jsou v rozmezí $10^0 - 10^2 \mu\text{m}$ [3].

Rozdělení mikrokompozitů podle materiálu matrice, která může být:

- polymerní,
- kovová,
- uhlíková,
- skleněná,
- sklokeramická,
- keramická.

Rozdělení mikrokompozitů podle tvaru výztuže:

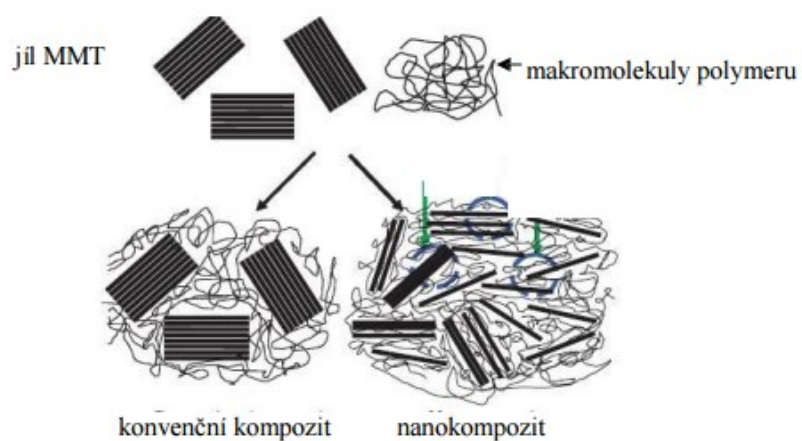
- 1) vláknové kompozity
 - a) s kontinuálními vlákny
 - b) s krátkými vlákny
- 2) částicové kompozity - obvykle anorganické částice, anizometrické mají určitý štíhlostní poměr l/t , kde l je délka a t tloušťka částice
 - a) sférické částice (izometrické)
 - b) destičkovité částice (anizometrické) [3].

1.3 Makrokompozity

Tyto kompozity obsahují výztuž velikosti příčného rozměru 10^0 až 10^2 mm a jsou nejvíce využívány ve stavebnictví (železobeton). Mezi makrokompozity lze zařadit i plátované kovy, vícevrstvé materiály a konstrukce (chodník, vozovka) [3].

1.4 Nanokompozity

Nanokompozity jsou kompozitní materiály, které mají rozměr výztuže v jednotkách nm. Rozdíl mezi mikrokompozity a nanokompozity s výztuží na bázi destičkovitých částic jílu znázorňuje obrázek 1.



Obrázek 1. Rozdíl mezi mikrokompozity a nanokompozity [3].

1.5 Vlákna

1.5.1 Definice

Vlákna se skládají z několika stovek nebo tisíců vláken, každé z nich má průměr mezi 5 a 15 μm , to umožňuje, aby byly zpracovatelné na textilních strojích například v případě skleněných vláken [1].

Pro vyztužení matrice k tvorbě kompozitu je k dispozici velký rozsah vláken, který je stále rozšiřován. Vedle přírodních vláken (bavlna, celulóza) jsou to vlákna kovová a slitinová, whiskery z keramických a metalických materiálů, polykrystalická vlákna z mnoha keramických materiálů, skleněná a minerální vlákna i vlákna polymerní [2].

- krátká vlákna mají délku v řádu zlomku milimetru do několika centimetrů. Jedná se o plsti, rohože a krátká vlákna použitá při vstřikování,
- dlouhá vlákna, která jsou řezána při výrobě kompozitního materiálu se použijí jako takové nebo tkané.

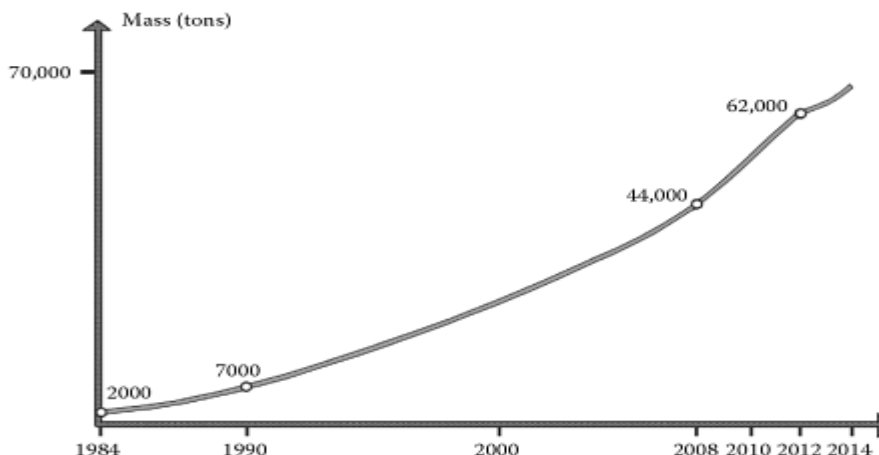
V tvořícím se vlákně se shromáždění vláken dělá pomocí vláknového formuláře pro zhotovení složeného materiálu. Může se využít následujících formulářů:

- jednorozměrné: jednorozměrné vleky, příze, nebo pásy,
- dvourozměrná: tkané nebo netkané textilie,
- trojrozměrného: tkaniny (někdy nazývány jako multidimenzionální tkaniny) s vlákny orientovanými podél několika směrů.

Před vytvořením výztuže jsou vlákna povrchově upravena nebo dimenzována, což má za následek:

- snížení oděru působením vláken při průchodu tkalcovským strojem,
- zlepšení přilnavosti vláken matrice [1].

Rychlý rozvoj uhlíkových vláken v průmyslu:



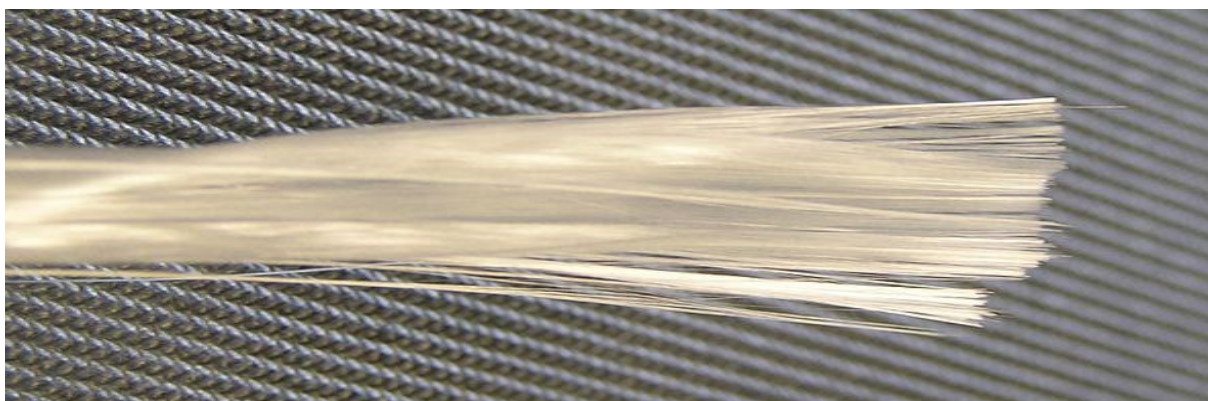
Obrázek 2. Roční kapacita výroby uhlíkových vláken [1].

1.5.2 Skleněná a minerální vlákna

Nejvíce rozšířený způsob výroby skleněných vláken je rychlým tažením z taveniny, obvykle v průměru 3,5 až 20 μm . Významný vliv na zvláknování má viskozita a rychlost změny viskozity s teplotou; obojí záleží na chemickém složení skla. Významně důležitá je teplota počátku tuhnutí taveniny, tj. teplota, při níž tekutá fáze a krystalická fáze mohou koexistovat v rovnováze. Na jednu je taženo 51 až 408 vláken neboli fibril, obvykle 204 vláken, která vytvářejí pramenec, který je základní jednotkou pro výrobky z vláken (provazce, rouna, tkaniny) [2].

Rovnoběžně sjednocené pramence vytvářejí provazce. Počet pramenců je 12 až 120, obvykle 60, a provazec je nejčastěji definován počtem pramenců nebo tzv. výtěžkem, tj. počtem metrů vláken na kilogram. Provazce se užívají pro přímé vyztužování mnoha výrobků (např. trub a nádrží), k výrobě vyztužujících tyčí, pro přípravu sekaného vlákna či mletého vlákna nebo mohou být předimpregnovány pryskyřicí. V netkaných rounech neboli rohožích jsou pramence náhodně ukládány do roviny tak, aby bylo dosaženo stejné distribuce vláken ve všech směrech, a na závěr jsou prošity. Ze skleněných vláken je možno vyrobit mnoho odlišných tkanin, používaných k dosažení vysokých pevností a modulů kompozitů [2].

V minulých letech došlo k mnoha pokusům s výrobou minerálních vláken, avšak bylo možno vyrábět minerální vlákna jen s malými pevnostmi, které byly nevhodné pro výztuž kompozitů. Vyvinutím vhodného výrobního postupu z čediče se podařilo obtíže překonat a vytvořit vlákna o průměru 5 až 25 μm s pevností kolem 3,5 GPa. Vlákna byla tažena při teplotě 1250 až 1370 $^{\circ}\text{C}$ a ze zvyšující se teplotou tavení se pevnosti zvyšovali. Skleněná a minerální vlákna se nejvíce používají v kombinaci s polymerní matricí [2].



Obrázek 3. Svazek skleněných vláken [5].

1.5.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna mohou být vyráběna více způsoby. Průmyslové metody jsou však omezeny na teplotní oxidaci a karbonizaci neboli také grafitizaci organických vláken nebo na pyrolýzu dehtových a asfaltových smol zvláknovaných z taveniny.

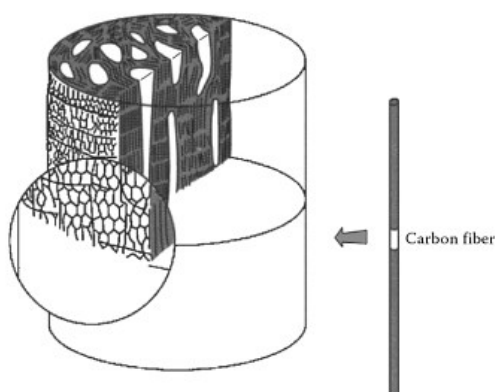
Za uhlíková vlákna jsou nejčastěji považována ta vlákna, která vzniknou při teplotě 800 až 1600 $^{\circ}\text{C}$, zatímco grafitová vlákna jsou vyráběna při teplotě nad 2200 $^{\circ}\text{C}$. Dalším kritériem je obsah uhlíku; vlákna s obsahem uhlíku do 92 % jsou označována za uhlíková, s větším obsahem uhlíku za grafitová [2].

Proces výroby z organických vláken je rozdělen do tří základních etap, které mohou být rozdílně modifikovány podle druhu původního vlákna:

- nízkoteplotní oxidace na vzduchu při teplotě 200 až 400 $^{\circ}\text{C}$,
- karbonizace v interní atmosféře při teplotě asi 1000 až 1500 $^{\circ}\text{C}$,
- grafitizace v interní atmosféře při teplotě přes 2200 $^{\circ}\text{C}$.

Většinou je během výroby vlákno pod tahovým namáháním, kdy dojde k orientaci malých grafitových krystalků vytvářených za vyšších teplot. Jestliže je mikrostruktura uhlíku neuspořádaná a výrobní teplota je nižší než standartní, mohou mít vlákna malou tepelnou vodivost. V důsledku toho může být tepelná vodivost jednou z vhodných kontrolních charakteristik kvality vyráběných vláken.

Výhodou uhlíkových vláken je velká pevnost, vysoký modul, malá objemová hmotnost, vysoká chemická odolnost, ale také neměnnost vlastností až do vysokých teplot, kdy ostatní materiály původní vlastnosti ztrácejí. Tyto vlákna však snadno oxidují při teplotách nad 500 °C, proto je nutná jejich dokonalá ochrana proti korozi vzduchem a oxidujícími látkami v atmosféře. Soudržnost s většinou matric je bez předběžné úpravy poměrně malá. Nejlepší způsob ke zlepšení soudržnosti je slabá oxidace povrchu nebo pokrytí vhodnými povrchovými vrstvami [2].



Obrázek 4. *Struktura uhlíkových vláken [1].*

1.5.4 Binární (multifázová) vlákna

Jedním s prvních binárních vláken byla borová vlákna. Bor má nízkou hustotu a velkou potenciální pevnost, ale v důsledku tuhosti a křehkosti není vhodný pro tažení do jemných vláken. S toho důvodu se vyrábí chemickou depozicí na velmi jemné wolframové dráty.

Wolframová vlákna jsou ohřata a během procesu udržována na teplotě asi 1100 °C, aby nedošlo k depozici boru s optimální velikostí krystalů. Krystaly jsou malé a mají průměr 2 až 3 nm, proto je materiál mikrokrytalický, amorfni a průměr vlákna je nejběžněji kolem 0,1 nm. Vlákna jsou vysoce pevná a tuhá, ale jejich vlastnosti se rychle zhoršují v rozsahu teplot 450 až 500 °C v důsledku dekompozice povrchových oxidů, umožňující oxidaci dalšího materiálu. Pro vyšší teploty (až do 700 °C) je nutné povléknout vlákna vhodnou povrchovou vrstvou tloušťky 2 až 4 μm. Povlak vytváří také ochranu proti reaktivním kovovým matricím. Tyto vlákna jsou velmi tvrdá a při zpracování se nepoškodí tak lehce jako např. skleněná. Kvůli velké tloušťce a tuhosti se borová vlákna obvykle nenavíjejí, ale dodávají se v pásčích impregnovaných pryskyřicí [2].

1.5.5 Polykrystalická (keramická) vlákna

Polykrystalická vlákna, použitelná především jako výztuž kovů a keramiky, mají extrémní odolnost prostředí, vysokou tuhost a pevnost a vysokou tepelnou odolnost 1350 až 1600 °C. Výroba se většinou skládá ze tří etap:

- materiál je připraven v tekuté formě jako viskózní suspenze nebo koloidní roztok,
- z něho jsou vytlačována vlákna, je odpařena voda,
- vlákno je stabilizováno do konečného krystalického stavu vysokou teplotou.

Výborné vlastnosti mají vlákna z nitridu boru; vysokou teplotní stabilitu, vysoký elektrický odpor, vysokou teplotní vodivost, oxidační stabilitu do 855 °C. Způsob výroby závisí ve zvláknění taveniny, nitridaci vláken, orientaci a stabilizaci nitridovaných vláken [2].

Vlákna karbidu křemíku se vyrábějí ve formě binárního vlákna, ale je možno užít i jiných způsobů jako je např. pyrolýza polymeru nesoucího Si. Tento postup umožňuje výrobu vláken o průměru 8 až 20 μm. Vlákna mají krystalickou strukturu z jemných náhodně orientovaných krystalů s minoritním obsahem SiO₂ a volného uhlíku.

Vynikající vysokou pevnost v tlaku a trvalou odolnost teplotám do 1000 °C mají hlinitanová vlákna. Nevýhodou je jejich křehkost. Podobné vlastnosti mají vlákna hlinito-křemičitá [2].



Obrázek 5. Keramická textilie [6].

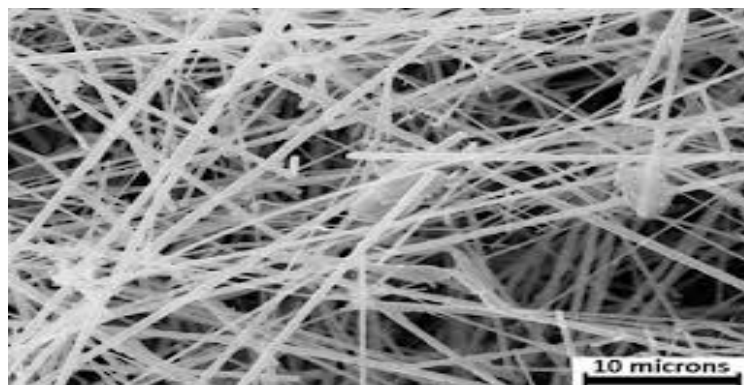
1.5.6 Kovová vlákna

Kovová vlákna umožňují vyztužovat polymerní, keramickou i kovovou matici. Vyrábějí se různými metodami; mechanickými, elektrochemickými, z tekutého kovu, depozicí par, kombinací těchto metod. Mezi kovová vlákna jsou zařazena i hybridní organo-kovová vlákna, např. Si – Ti – C – O. Kovokeramická vlákna je možno vyrobit i z různých kovových oxidů, jako Al – B – Si, Al – Cr – Si, Zr – Si [2].

1.5.7 Whiskery

Whiskery jsou vláknité krystaly, s průměrem kolem 1 μm a délkou 3 až 4 mm, jejichž vlastnosti značně převyšují vlastnosti mnoha jiných forem tuhých látek. Jejich průřez je hexagonální, čtvercový nebo rovnoběžníkový, povrch je bez trhlinek a rovněž vnitřní struktura neobsahuje žádné inkluze, trhliny nebo jiné chyby. Whiskery se vyrábějí z řady materiálů; jejich vlastnosti závisí na podmínkách růstu, dokonalosti povrchu a na průměru. Tlusté whiskery mají několik dislokací a jsou poměrně nepevné; tenké whiskery (do 1 μm) mohou obsahovat jen jednu šroubovitou dislokaci podél osy whiskeru, která se nemůže pohybovat při osovém tahovém namáhání. Jestliže je poměr průměru k délce malý, mluvíme o jednokrystalových destičkách, které mohou mít vysokou pevnost.

Mezi whiskery můžeme také zařadit fosfátová mikrovlákná. Jedná se o vápníko-sodíkový metafosfát, jehož strukturní páteř tvoří kovalentně vázaný anorganický polymer. Mikrovlákná mají vysokou pevnost a tají při teplotě 749 $^{\circ}\text{C}$ [2].



Obrázek 6. Elektronová mikroskopie SiC whiskerů [7].

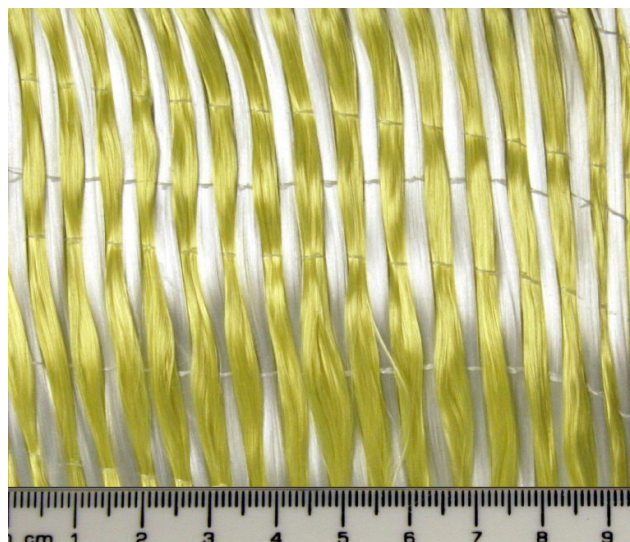
1.5.8 Polymerní vlákna

Množství přírodních vláken má výborné vlastnosti; nejlepší přírodní polymer má pevnost kolem 1/5 teoretické pevnosti. Nevýhoda přírodních vláken je jejich velká citlivost vodě a biologické korozi.

Dnes vyráběná vlákna z vysoce orientovaného aromatického polyamidu (Kevlar) dosahují vysokého modulu, pevnosti a jsou určena pro výztuž kompozitu. Kevlar je velmi houževnatý, ale tlakové pevnosti jsou slabé. Tato nevýhoda je lehce vyvážena tím, že Kevlar není ovlivněn povrchovými imperfekcemi a jeho vlastnosti se nemění podle délky, na níž je pevnost měřena.

Nevýhodou všech polymerních vláken je citlivost na vyšší teploty, např. polyamid ztrácí většinu pevnost už pod 100 °C. Aramid je však úplně stabilní do 150 °C, s nízkou ztrátou pevnosti při 200 °C, přibližně 30 % ztrátou při 250 °C po 8 hodinách, rozkládá se při asi 425 °C. Při teplotě tekutého vodíku nemění vlastnosti a je stále stejně houževnatý.

Vlastnosti polymerů jsou částečně ovlivněny výrobními procesy, které způsobují kontrolovaný stupeň anizotropie. Nejslibnější způsob výroby se zdá být tažení syntetických vláken k dosažení velmi zlepšených vlastností ve směru vláken. Při dloužení dochází k základním strukturním změnám polymeru; vysoce krystalické oblasti jsou spojeny polymerními řetězci nebo interkrystalinickými můstky. Tyto strukturní modifikace jsou příčinou významných změn vlastností [2].



Obrázek 7. Aramidová vlákna [8].

1.6 Matrice

1.6.1 Definice

Hlavní funkcí matrice je spojovat vyztužující fázi a chránit ji před vlivy okolí. Funkci pojiva by si matrice měla udržet i po prvních narušeních vláknové výztuže. Mezní poměrné prodloužení matrice při tahovém namáhání by mělo být větší než mezní prodloužení vláken. Tomu to požadavku však vyhovují pouze polymerní a kovové matrice. Keramické, skelné, sklokeramické a uhlíkové matrice mají mezní prodloužení při lomu menší než vlákna. Na obrázku 8. jsou graficky znázorněny křivky napětí - poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním uhlíkového vlákna [9].



Obrázek 8. Schematické znázornění rozdílů v křivkách napětí - poměrné prodloužení různých matric v porovnání s chováním standardního uhlíkového vlákna [9].

1.6.2 Kovové matrice

Použití kovové matrice pro kompozity má proti nejvíce používané polymerní matrice řadu výhod, např. elektrickou vodivost, teplotní vodivost, nehořlavost, smykovou pevnost, tvárnost, odolnost obrusu, možnost povlakování, spojování, tvarování, vyšší tepelnou odolnost. Oproti tomu charakteristické vlastnosti, jako je pevnost a tuhost, jsou za běžných teplot nižší než u polymerních kompozitů a také výrobní požadavky (zejména energetické) jsou podstatně vyšší [2].

Nejpoužívanější kovová matrice je z hliníku a jeho slitin, a to nejen pro jeho širokou univerzálnost, ale především pro jeho nízkou cenu. Tyto slitiny hliníku jsou nejčastěji vyztužovány borovými, uhlíkovými, křemíkokarbidovými vlákny. Matrice může být vyrobena z prášku (plazmové nanášení), fólie (lisování za tepla, válcování), taveniny (infiltrace, lití). Postup výroby je potřeba volit tak, aby došlo k dokonalému spojení matrice s vlákny bez mechanického poškození vláken, bez jejich degradace, bez zkřehnutí matrice, s dostatečnou soudržností ve styku matrice-vlákna i matrice-matrice. Obvykle je postup ve dvou fázích: nejprve se vyrobí jednoduché tvary (páska) a dále se z nich vytváří požadovaná složitější struktura. Kvalita a vlastnosti těchto kompozitů závisí na správně vybraných výrobních metodách [2].

1.6.3 Keramické a skleněné matrice

Keramika je zajímavý materiál pro vysoké pevnosti při vysokých teplotách, pro malou hustotu a pro velmi dobrou odolnost oxidaci. Nevýhodou je velká křehkost. Keramika může být vytvořena v různých formách, s rozdílnými vlastnostmi. Kvůli vysokému modulu a nepatrnému creepu jsou k jejímu vyztužení vhodná jen některá vlákna, i když nejde vyvrátit úspěšnou aplikaci tažných vláken. Nekoherentní kontakt mezi vlákny a maticí zajišťuje, že trhliny se budou šířit spíše okolo vláken než přes ně. Jestliže mají vlákna větší teplotní vodivost než matrice, můžou také zlepšit odolnost teplotnímu šoku. Nejčastěji se pro matici používají oxidy, nitridy nebo karbidy různých prvků jako jsou nolit, Al_2O_3 , ZrO_2 , ThO_2 , UO_2 , sklo i grafit. Spojení vláken s maticí je většinou slabé, i když lze nalézt i výjimky zapříčiněné chemickou reakcí mezi oběma partnery. Pokud je součinitel teplotní roztažnosti vláken větší

než součinitel teplotní roztažnosti matrice, je možné úplné oddělení, takže přilnavost podél hranic je nulová [2].

Velice perspektivní systém je uhlíková matrice nebo binární matrice C – SiC, vyztužená uhlíkovými vlákny. Matrice může být vyrobena buď karbonizací organických tuhých nebo tekutých látek smíšených s C – vlákny, nebo chemickým nanášením uhlíku z uhlovodíkových par na C – vlákna [2].

1.6.4 Silikátové matrice

Mnoha vlákny lze vyztužovat kromě skla a keramiky řadu jiných anorganických, nejvíce křehkých materiálů, jako cementovou maltu a beton, sádku a jiné.

V cementové matrici, jež je silně alkalická, dochází ke korozi většiny skleněných vláken, a proto musí být chráněná, nebo musí být použita speciální skla. U sádkové matrice jsou skleněná vlákna běžně pokryta polyvinylacetátovým povlakem, kvůli zvýšení soudržnosti. Množství vláken musí být většinou menší, než je 6%, aby se neúnosně nezhoršila zpracovatelnost. Vodní odolnost lze zvýšit jistým přídavkem vláken absorbujících vodu (např. celulosových) [2].

1.6.5 Polymerní matrice

Vláknové kompozity s polymerní matricí mají nejdelší tradici. Podle vlastností i podle postupu výroby se významně liší podle toho, je-li polymer termoplast nebo reaktoplast.

Termoplastové polymery pro matrici mohou výrazně omezovat cenu kompozitů. Cenové úspory jsou především následkem snadnější výroby i složitých tvarů. Výhodou může být především dobrá dimenzionální stabilita, malý obrus, zvýšená pevnost, modul a houževnatost. Z termoplastů, které jsou vhodné pro vyztužování vláken, jsou nejčastěji polyamidy, polyethylen, polypropylen, polykarbonát, styren – akrylonitril acetáty, polybutylentereftelát, polysulfon atd. Vlastnosti těchto kompozitů, které jsou nehomogenní a anizotropní, závisí na postupu výroby. Výrobní postup ovlivňuje rozložení vláken, orientaci vláken, stupeň porušení vláken. Dále vlastnosti závisí na pevnosti a jiných vlastnostech

vláken i na viskoelastickém chování matrice. Povrchové úpravy, nejčastěji např. epoxidy, polyamidy, polyimidy, výrazně zdokonalí smáčení a adhezi k matrici a sníží zbytková napětí na rozhraní, a tím zlepší konečné pevnosti [2].

Reaktoplasty vyztužené vlákny jsou nejvíce rozšířenější konstrukční kompozity a dnes zasahují do většiny odvětví průmyslu s širokým seznamem maticí, výztuží, uspořádání, způsobu výroby a vlastností. Vlákná mohou být účelně uspořádána rozmanitým způsobem nebo náhodně orientovaná. Pro matrice jsou nejvíce rozšířené polyesterové, epoxidové, melaminové a siloxylové pryskyřice. Pro speciální účely se začaly využívat také polybenzimidazoly, polyimidy, polyquinoxaliny, polybenzothiazoly, pyrroony [2].

Jednotlivé kompozitní pásy (fólie) je možno připravovat mnoha různými způsoby, často ve tvaru prepregových pásů, které se spojují do laminátů požadované tloušťky a vlastností. Přítomnost velkého množství mezipovrchů, tj. velkého vnitřního povrchu, je do jisté míry příčinou velké pevnosti a houževnatosti kompozitů, ale může způsobit i problémy, jejichž vlivem může občas i převýšit výhody. Velký vliv na vlastnosti kompozitů má i zde kvalita spoje mezi vlákny a matricí např. póry nebo vzduchové kapsy na vláknech způsobují koncentrace napětí a zapříčiňují vybočení vláken [2].

1.7 Prepregy

Ploché útvary, jejichž hlavní složkou je výztuž předimpregnovaná pryskyřicemi, které jsou částečně vytvrzené, se nazývají prepregy. Tyto listové polotovary lze na sebe vrstvit do vyhovující tloušťky a ve formách je pak dotvarovat a dotvrdit působením tepla případně i tlaku.

Prepregy lze rozdělit do dvou skupin:

- tkaninové nebo jednosměrné „neplastické“ prepregy,
- lisovací rohože – SMC.

Tzv. „neplastické“ prepregy jsou tvořeny tkaninami, jedno nebo více směsnými výztužemi na bázi skleněných, uhlíkových nebo aramidových vláken nebo hybridními tkaninami a jsou nejčastěji impregnovány epoxidovými pryskyřicemi s různými typy tužidel

pro odlišné teploty vytvrzování a aplikace. Obsah výztuže je 50-70%. Ve formě působením tepla (tlaku) již nemění rozměr.

SMC prepregy jsou směsí sekaných, nejčastěji skleněných vláken o délce 25 - 50mm, polyesterových nebo vinylesterových pryskyřic, vytvrzovacích složek, inertních plniv, termoplastických aditiv pro zlepšení tokových vlastností a snížení smrštění, pigmentů, vnitřních separátorů a zahušťovadel. Směs se nanáší souvisle na podložný pás s polyetylenovou separační folií, která se také užívá jako vrchní separační vrstva. Materiál se navíjí do rolí, které před expedicí dozrávají určitý čas při regulované teplotě, přičemž se pojivo částečně vytvrzuje do tzv. stavu B. Je pak schopno při vlastním zpracování za tepla a tlaku konečného vytvrzení [10].



Obrázek 9. Přednasycená prepreg tkanina [11].

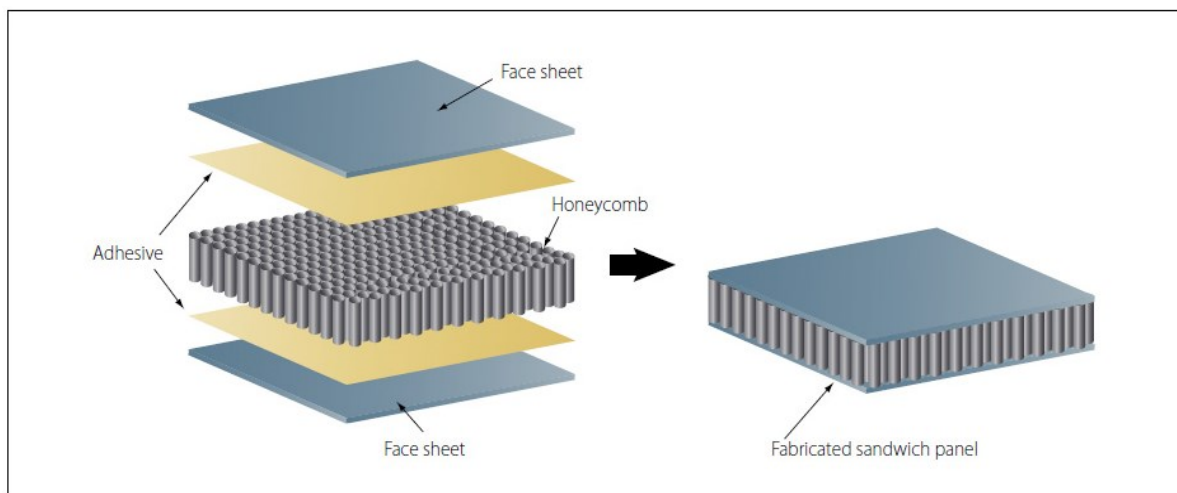
2. SENDVIČOVÉ STRUKTURY

2.1 Koncepce a design

Použití plochých desek u kompozitů je logické, protože do značné míry jsou kompozity vyráběny pomocí odlišných metod, aby se zajistilo zesílení vláken u plochých desek, které jsou umístěny do forem. V případě že, síla, která odolává a působí podél roviny $x - y$, mohou být vlákna orientována ve směru síly pro zvýšení pevnosti kompozitu. Pokud jedna vrstva nebo vrstvy kompozitu nejsou dostatečně pevné a tuhé jak je požadováno, více vrstev kompozitu může být vázáno k těm, které jsou již přítomné a celková pevnost vláken působí společně v rovině $x - y$. Takže tím, že je zvýšen počet vrstev a orientací vláken ve směru síly, můžou síly v rovině $x - y$ odolávat. Ale co v případě, že síla působící na kompozit je ve směru kolmém k rovině $x - y$. V laminátové struktuře, v případě, že je síla kolmá ke směru vláken, mají tato vlákna malou schopnost odolávat. V podstatě lze říci, že síla ve směru z a tuhost vrstveného kompozitu je dána pevností a tuhostí matrice [12].

Nejběžnější způsob řešení tohoto problému ve směru z jsou sendvičové struktury. Skládají se ze dvou čelních plátů, jádra a adhesivních materiálů. Čelní pláty (horní a dolní struktury) jsou tradiční kompozitní lamináty. Přítomné lepidla mají za úkol držet struktury pohromadě.

Termín dvojité kompozitní struktura popisuje koncept sendvičové konstrukce. Oba se skládají z různorodých materiálů spojených dohromady, aby vytvořily něco, co má lepší vlastnosti než které, by měly komponenty samostatně. Jinými slovy, je to celkově kompozitní struktura obsahující kompozitní komponenty. U těchto sendvičových struktur, jako jsou dvojité kompozitní struktury, je zřejmé, že v případě správného pracování musí všechny součásti pracovat společně. Na druhou stranu, celková kompozitní struktura může mít některé stejné kritické konstrukční a výrobní problémy stejně jako jednodušší kompozitní struktury [12].



Obrázek 10. *Komponenty sendvičové struktury [13].*

Například u navrhování a výroby vláken s pryskyřice kompozitů a jejich použití v sendvičových strukturách je třeba vzít v úvahu:

- kompromisy pro maximalizaci výkonu a nákladů,
- pečlivý výběr materiálů pro dosažení optimálních strukturních vlastností,
- podmínky životního prostředí během použití,
- výroba sendvičové struktury,
- různé konstrukční a provozní problémy, a to zejména ve vztahu ke konkrétní aplikaci [12].

2.2 Jádra

Některé klíčové vlastnosti jsou velmi důležité pro celkový výkon sendvičové struktury. Ostatní nejsou tak kritické, ale mohou být bonus při výběru materiálu pro některé specifické aplikace. Nejčastější materiály jádra mohou být rozděleny do čtyř hlavních typů:

- balzové dřevo,
- pěny,
- voštiny.
- šité/stlačené materiály.

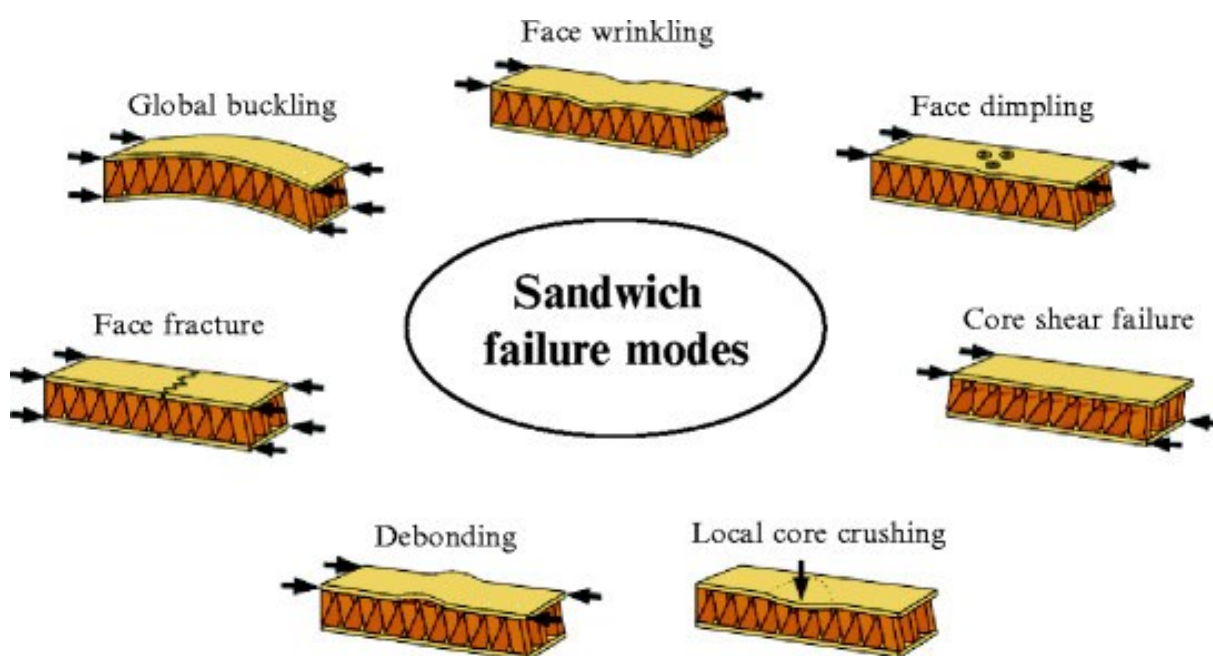
V rámci každé kategorie existuje několik specifických druhů, kdy se všechny liší odlišnými vlastnostmi. Každý z nich má inherentní výhody i nevýhody, které by měly být uváženy pro každou aplikaci. Charakter jádra je důležitý činitel určující pevnost v tlaku sendvičové struktury. Je zřejmé, že materiál jádra, musí být schopný odolávat síle působící ve směru osy z. Z tohoto důvodu je důležité, aby tyto materiály byly silné a tuhé ve směru z. Tyto materiály jsou obvykle přijatelné svou tuhostí a pevností. Další kritická strukturální vlastnost je schopnost jádra vydržet zatížení ve směru x a y. Protože celá sendvičová struktura je navzájem spojena, umisťují se síly ve směru x a y do možného smykového namáhání [12].

U některých materiálů je velmi důležitá orientace jádra. Například, balzové dřevo je běžný materiál pro jádra, protože je lehký, ale je orientováno tak, že směr z dřevěných vláken je ve směru z. Přirozená pevnost buněk dřeva pomáhá poskytnout podporu až do vnitřku jádra. Podobná situace je u houštinových materiálů. Používají se s buňkami orientovanými ve směru z, protože je to jejich směr síly [12].

Velký význam u některých aplikací má odolnost proti nárazu. Vysoká tuhost materiálu jádra je často nevýhodná, protože vysoká tuhost obvykle přichází s vysokou křehkostí. V důsledku toho může dojít k rozbití jádra. Nejlepší materiály pro jádra jsou s mírně vyšší pružností. Tato vlastnost je obvykle spojena s termoplastickými materiály, jako je polypropylen, nezesítný polyvinylchlorid nebo styren – akrylonitrilový kopolymer nebo kovové voštinové jádro. Pokud je jádro poškozeno, způsob opravy obvykle zahrnuje vložení zástrčky z materiálu jádra a dochází k opětovnému vytvoření laminátové vrstvy. Další důležitá vlastnost je odpor materiálu jádra k šíření trhlin. Opět platí, že vysoká tuhost a výsledná křehkost mají tendenci mít za následek vysoké šíření trhlin. Další vlastnost, která se váže k tuhosti / křehkosti je odolnost proti únavě. Tato vlastnost je zavedena jako odolnost vysokým dynamickým zatížením [12].

2.3 Testování

Některé poznatky jsou vhodné vzhledem k povaze testování kompozitů. Strukturní vlastnosti kompozitů a dalších materiálů se obvykle stanoví pomocí standardních testů, z nichž mnohé byly vyvinuty pro kovy. Mnoho z těchto testů byly upraveny tak, aby poskytovaly srovnatelné výsledky pro tradiční pryskyřicové vlákna, u kompozitních laminátů, ale jen málo z nich byly upraveny pro sendvičové materiály. Z tohoto důvodu, jsou sendvičové materiály někdy v nevýhodě ve srovnání s jinými materiály, jsou-li porovnány jen údaje ze zkoušek. Bylo prokázáno, že některé testy jsou zvláště vhodné pro sendvičové materiály a mnoho nejběžnějších aplikací [12].



Obrázek 11. Druhy poruch sendvičových struktur [14].

2.4 Výroba

Nejdůležitější část výroby sendvičového materiálu je lepení materiálu jádra s předními pláty. To se provádí lepící fólií, která je umístěna mezi předními pláty a jádrem. Zkušenosti ukázaly, že tvrdé lepidla fungují nejlépe, protože se mohou mírně prodlužovat a přijmou menší posunutí bez praskání. Lepidlo musí být dostatečně silné, aby došlo k dokonalému spojení po celém povrchu. Lepidlo je nevyztužená vrstva pryskyřice, která má menší pevnost než pryskyřicová vlákna laminátu. Je-li jádro z absorpčního materiálu, jako je balzové dřevo, voštiny, šité / stlačené materiály, je třeba dbát, aby se zabránilo nadměrné infuzi pryskyřice do jádrové vrstvy. V případě, že pryskyřice byly absorbovány nebo protekly do jádra, mohlo by to narušit rozhraní a výrazně oslabit vazbu. U voštin bylo prokázáno, že správné množství lepidla mírně prosakovat do voštinových buněk může, čímž se získá dobrá vazba na stěnách, ale nesmí prosakovat nadměrně. Pro dosažení tohoto mírného prosakování, musí být viskozita adhezivního materiálu pečlivě kontrolována při teplotě použité pro vytvrzení. Některé jádra mají plát vázaný na horní část jádra, aby se zabránilo nadměrné infuzi pryskyřice [12].

V jednom případě je tok pryskyřice do jádra žádoucí. To je, když není problém váha a materiál jádra by mohl být vystavený vysokým svislým zatížením. V tomto případě se lepidlo použije k tomu, aby pryskyřice proudila do jádra a vazby na rozhraní. Pryskyřice uvnitř buněk má tendenci udržet buňky paralelně, čímž se výrazně zvyšuje pevnost v tlaku.

Téměř ve všech sendvičových strukturách a aplikacích, poté, co jsou jádro a lícni pláty vázány, je obvykle zapotřebí utěsnění. Toto těsnění může být provedeno několika různými způsoby. Jedním z nich je použití tlusté pryskyřice, někdy se vyztužené vlákna vyfrézují podél okraje. Jiný způsob utěsnění je zacpat odkryté konce jiným materiálem. Některé typické materiály k zacpání jsou balzy, vstřikované plasty, tvarované kovy nebo keramika. Tyto materiály jsou obvykle vázány na místě. Další z možných způsobů utěsnění je tvarování jádra, takže se zužuje na hladký povrch a pak se spojí plochy dohromady nebo se zabalí jeden z čelních plátů přes konec [12].

2.5 Spojení

Stejně jako obecné konstrukční kritéria a metody pro kompozitní lamináty a sendvičové materiály, vyvíjí se i způsoby spojování těchto materiálu na sebe nebo spojování s jinými materiály. Existují dva obecné typy spojování kompozitů, tj. mechanické, což je nýtování a šroubování nebo chemické, což je svařování, difúzní spojování, lepení a míchané svařování [12].

V každém kloubu jsou kompozitní materiály spojeny dohromady a je mezi nimi vytvořen otvor. Mechanické spojení; nýt, šroub, vrut atd. se umístí do otvoru a upevní se. Zatímco rovný klín je nejjednodušší spoj ale je nesymetrický, to znamená že, smykové síly jsou téměř vždy v kloubu přítomny. Tyto síly mohou zlomit spojovací zařízení a můžou dokonce změnit charakter laminátu odolávat silám. Z tohoto důvodu, kontrolní klín má menší sklon k smyku a dvojitý klín ještě méně. Nevýhodou obou těchto spojů je doplňkový materiál, který je nutné použít. Tupý spoj je jednoduchý způsob spojení dvou vrstvených materiálů. Tato metoda je podobná typu běžné opravy [12].

Kromě konstrukce kloubu jsou brány v úvahu další kritéria:

- materiály upevňovacího prvku,
- tvar upevňovacího zařízení,
- pevnost spojovacího prvku,
- velikost otvoru,
- ztráta síly, což je zapříčiněno odstranění materiálů při zhotovení otvoru.

Mechanické spoje mají několik výhod, jsou to:

- mechanické spoje mají malé dotvarování,
- mechanické spoje jdou relativně snadno kontrolovat,
- mechanické spoje mohou být navrženy pro přístup, zatímco lepené spoje jsou napevno,
- malá příprava povrchu
- dosedací plochy materiálů, které mají být spojeny, jsou relativně nedůležité,
- mechanické spoje jsou méně citlivé na teplo, vodu a jiné degradace životního prostředí [12].

Mnoho kompozitních spojů je vyrobeno vytvořením chemické vazby, tj. za pomoci lepidla. Výztuhy, které se vytvrzují současně jako laminát, jsou často vyrobeny ze stejného materiálu jako právě laminát. To má za následek migraci společných molekul matrice přes rozhraní výztuhy a laminátu tak, že materiály jsou integrálně spojeny. Proces vytvrzování laminátových materiálů ve stejnou dobu, kdy dochází ke spojení dohromady, se nazývá Co – vytvrzování. Vytvrzené vazby jsou často nejsilnější chemické vazby, které se mezi lamináty mohou vyskytovat[12].

Účinnost lepení závisí na mnoha proměnných, včetně:

- příprava povrchu materiálu a způsob přípravy,
- tvar spojované části a spáry,
- adhezivní složení,
- postup aplikace,
- nářadí,
- proces vytvrzování [12].

2.6 Příprava povrchu

Příprava lepených povrchů je mimořádně důležitá při lepení. To má velký vliv na stálost vazby. Povrch kompozitního materiálu musí být bez mastnoty a jiných nečistot. Jeden kontaminant, který vyžaduje odstranění je forma separačního prostředku, který je často přítomen na vytvrzených kompozitech. Typický postup čištění povrchů zahrnuje: otření rozpouštědlem nebo odmašťování párou, opláchnutí vodou nebo alkalickým roztokem, pak obroušení povrchu broušením nebo škrabkou s brusným účinkem, znovu otření rozpouštědlem, opláchnutí destilovanou vodou a sušení v peci. Broušení nebo škrábání s brusným účinkem zvyšuje povrchovou energii a plochu, čímž se zlepši schopnost spojení materiálu [12].

Pokud je matrice polyester nebo vinylester, je třeba věnovat zvláštní pozornost, zda je vytvrzení matrice na vnějším povrchu úplné. Kyslík omezuje polyesterové vytvrzení stejně jako odpařování styrenu na povrchu. Výsledkem toho je, že vnější vrstva polyesteru nebo vinylesteru není zcela vytvrzená, zatímco vnitřek je vytvrzen správně. Tento stav může být detekovat mírné změkčení vnějšího povrchu kompozitu. V případě, že stav existuje a vazba je provedena, neúplné vytvrzení může pomoci zlepšení vazby mezi laminátem a lepidlem.

Důvodem je, že nevytvrzené molekuly matrice mohou migrovat do mezifází adhezivních molekul a naopak, což vytváří stejný účinek, jako když jsou dva lamináty společně vytvrzeny [12].

Mnoho polyesterových a vinylesterových materiálů obsahuje vosk nebo jiné vnitřní činidlo, které vytváří povlak na horní části vytvrzeného polymeru, a tím vylučuje kyslík a zachovává styren. To má za následek úplné vytvrzení kompozitu, až k vnějšímu povrchu. Ale, vosk nebo jiné činidlo často brání dobrému spojení s lepidlem. Z tohoto důvodu je důležité, aby došlo k odstranění těchto povlaků. Nejběžnější způsob odstranění těchto povlaků je broušením [12].

V případě, že kompozit má být navázaný na kov, musí být pečlivě připraven povrch kovu. V případě hliníku je nejčastěji jako čistící metoda používána anodická oxidace kyseliny fosforečné a následuje základní nátěr. Titan by se měl nechat reagovat s fluoridem fosfátu nebo anodizační metodou. U jakéhokoliv kovu by mělo být pečlivé zpracování, aby se dosáhlo stabilního povrchu [12].

2.7 Postup aplikace

Poté, co jsou povrchy řádně připraveny, použije se lepidlo. Lepidlo se obvykle udržuje při nízké teplotě. Po zahřátí nebo v případě dvousložkových lepidel po smísení se lepidlo pečlivě aplikuje na ošetřené povrchy. Lepidlo by mělo být aplikováno na doporučené tloušťce. To by mělo zahrnovat dosedací plochu, ale vrstva by neměla být příliš silná. Lepidlo je nevyztužená pryskyřice a není tedy tak silné jako spojené lamináty. V případě že adhezivní vrstva je příliš silná, může se stát, že lepidlo bude důležitým bodem selhání pro celou strukturu. Typická tloušťka lepicí vrstvy je 0,1 – 0,2 mm [12].

Lepení má některé nevýhody, ale i některé výhody. Výhody lepení ve srovnání s mechanickým spojením jsou následující:

- lepené spoje mají nižší koncentrace napětí,
- lepené spoje eliminují potenciální rozvrstvení,
- při prvním použití zatížení mají méně trvalou deformaci,
- lepené spoje váží méně než ekvivalentní mechanické spoje,
- lepidlo umožňuje hladké vnější povrchy u kloubu,
- lepené spoje jsou obvykle levnější,
- lepidlo dobře funguje u tenkých laminátů,
- lepení je méně citlivé na cyklické zatěžování [12].

3. SDÍLENÍ TEPLA

Sdílením tepla je označována energie z oblasti o vyšší teplotě do oblasti s teplotou nižší. To je dáno platností druhého termodynamického zákona. Vedení tepla probíhá v tuhých látkách obecně, nebo v tekutinách, které jsou, nebo nejsou v pohybu. Existují 3 základní mechanismy sdílení tepla:

- vedením,
- prouděním,
- sáláním.

Spojením vedení a proudění vzniká tzv. prostup tepla.

Množství tepla přenesené přes izotermický povrch za jednotku času se nazývá tepelný tok. Tepelný tok vztažený na jednotku izotermické plochy se nazývá hustota tepelného toku q [$W \cdot m^{-2}$]. Vzájemný vztah je:

$$P = q \cdot S [W] \quad (3.1)$$

První Fourierův zákon říká, že hustota tepelného toku je úměrná zápornému gradientu teploty:

$$q = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial t}{\partial y} + \frac{\partial t}{\partial z} \right) [W \cdot m^{-2}] \quad (3.2)$$

Teplotní vodivost (α) je podíl tepelné vodivosti a součinu hustoty a měrné tepelné kapacity za konstantního tlaku. Měří schopnost materiálu vést tepelnou energii vzhledem ke své schopnosti ukládat tepelnou energii [15].

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (3.3)$$

Ve fyzice označuje tepelná vodivost schopnost daného kusu látky, konstrukce (např. zdi), vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiných, chladnějších částí [16].

Součinitel tepelné vodivosti je fyzikální tepelný parametr látky, který závisí na teplotě, tlaku a chemickém složení dané látky. Lze říct, že součinitel tepelné vodivosti je množství tepla, které projde za jednotku času jednotkovou plochou izotermického povrchu.

$$\lambda = - \frac{Q}{\text{grad } t \cdot S \cdot \tau} [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (3.4)$$

Tento součinitel se určuje experimentálně pro každou látku odlišnými metodami – metoda laserová, horké desky, odporová. U každé experimentální metody, která se pro určení součinitele tepelné vodivosti použije, je nutné znát hustotu tepelného toku a rozdíl teplot měřeného materiálu na dané tloušťce materiálu [15].

Součinitel teplotní vodivosti je termofyzikální parametr látky a charakterizuje rychlost změny teplotního pole. Čím je tato hodnota větší, tím rychleji se změna teploty na povrchu projeví uvnitř tělesa [15].

Molární tepelná kapacita nebo molární teplo je tepelná kapacita vztažená na jednotku látkového množství, tedy na jeden mol. Jde tedy o množství tepla, které je třeba ke zvýšení teploty jednoho molu látky o jeden teplotní stupeň. Molární tepelná kapacita je mírně teplotně závislá, proto je zapotřebí při přesnějších hodnotách uvádět, k jaké teplotě látky se vztahuje. Specifická tepelná kapacita se vztahuje k jednomu kilogramu látky v našem případě za konstantního tlaku (c_p) [17].

$$c_p = \frac{dQ}{mdT} [J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}] \quad (3.5)$$

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4. TEPELNÉ VLASTNOSTI SENDVIČOVÝCH STRUKTUR

Vývoj nových materiálů a rozvoj materiálového inženýrství ovlivnily vývoj měřících metod fyzikálních vlastností v průběhu posledních několika desetiletí. Termofyzikální vlastnosti jsou některé z nejdůležitějších vlastností materiálu. Vývoj elektroniky a počítačové technologie má za následek přechod ze stacionárních na nestacionární metody. Přechodné metody jsou založeny na generování dynamického teplotního pole uvnitř vzorku. Proces měření můžeme popsat následovně. Teplota vzorku je stabilizovaná a jednotná. Pak dynamický tepelný tok, ve formě impulzu nebo postupné funkce, je generován uvnitř vzorku. Z teplotní reakce malého narušení můžou být stanoveny termofyzikální parametry vzorku.

4.1 Charakteristika dodaných vzorků

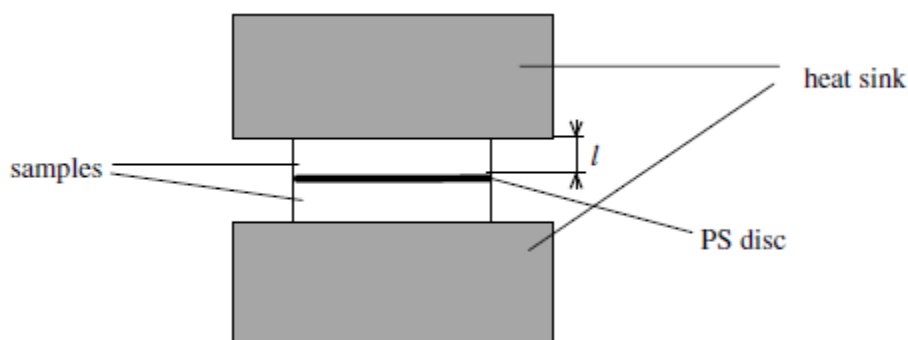
Vzorky sendvičů byly dodány Ing. Vladimírem Rusnákem z firmy Form s.r.o. a jejich složení je v tabulce 1.

Tabulka 1. Složení sendvičových vzorků

VZOREK	SKLADBA
1	2x fenolický prepreg PH840-300-42
	1x voština Cormaster C2-3,2-48 9 mm
	1x fenolický prepreg PH840-300-42
2	2x fenolický prepreg PH840-300-42
	1x Airex T90.100 9 mm
	1x fenolický prepreg PH840-300-42
3	1x rohož 300 g/m ²
	1x Bidiagonální tkanina Saertex 980 g/m ²
	1x Airex T90.100 10 mm
	1x Bidiagonální tkanina Saertex 980 g/m ² povrchová úprava gelcoat BUFA 250
4	2x fenolický prepreg PH840-300-42
	1x Corecork NL 10 10 mm
	1x fenolický prepreg PH840-300-42
5	1x rohož 300 g/m ²
	1x Bigiagonální tkanina Saertex 980 g/m ²
	1x Corecork NL 10 10 mm
	1x Bigiagonální tkanina Saertex 980 g/m ² povrchová úprava gelcoat NGA Hx3 RAL 9010

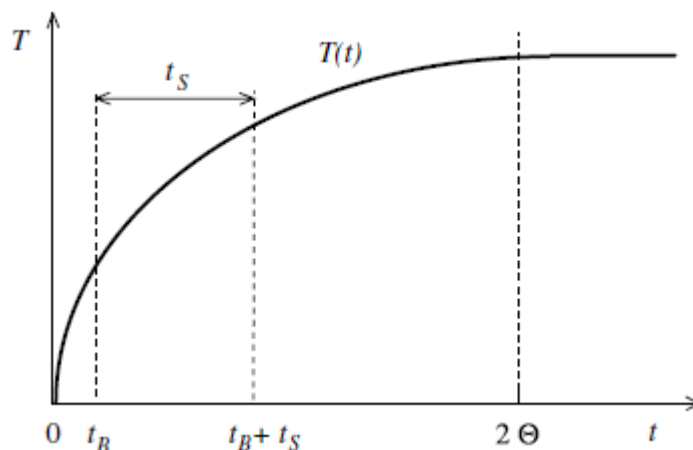
4.2 Měření tepelných vlastností

Metoda rozšířeného plošného zdroje (EDPS) je uspořádána pro jednorozměrné proudění tepla v konečném vzorku. Uspořádání experimentu je zřejmé z obrázku 12. Rovinný zdroj (PS) ve tvaru disku, který slouží současně jako zdroj tepla a teploměr, je vyroben z niklu pokrytého z obou stran fólií s kaptonu. Teplo ve tvaru krokové funkce se tvoří průchodem elektrického proudu přes PS disk. Dva identické vzorky válcového tvaru způsobují symetrické rozdělení tepelného toku do velmi dobrého tepelně vodivého materiálu (chladiče), který stanoví, izotermické okrajové podmínky experimentu. Tato metoda se jeví jako užitečná pro současné stanovení teplotní vodivosti a tepelní vodivosti nízko tepelně vodivých materiálů. Celkově bylo měřeno pět různých vzorků, každý pět krát metodou EDPS a pět krát metodou TPS. Spolu 50 měření. Hodnoty uvedené v tabulkách 4.1 a 4.2 představují aritmetické průměry z pěti měření pro jeden vzorek.



Obrázek 12. Schéma experimentu

Obrázek 13. znázorňuje funkci teoretické teploty, která je řešením parciální diferenciální rovnice s okrajovými a počátečními podmínkami odpovídajícími experimentálnímu uspořádání.



Obrázek 13. Průběh tepelné funkce

Teplotní funkce má tvar:

$$T(t) = \frac{gl}{\lambda\sqrt{\pi}} \cdot F(\theta, t) \quad (4.1)$$

kde

$$F(\theta, t) = \sqrt{\frac{t}{\theta} \left(1 + 2 \sqrt{\pi \sum_{n=1}^{\infty} \beta^n} \operatorname{erfc} \left(n \sqrt{\frac{\theta}{t}} \right) \right)} \quad (4.2)$$

kde q je proudová hustota tepla, λ je tepelná vodivost, parametr β popisuje nedokonalost chladiče a θ je charakteristický čas vzorku daný vztahem:

$$\theta = \frac{l^2}{a} \quad (4.3)$$

kde l je tloušťka, a je tepelné vodivosti vzorku.

4.3 Výsledky měření

Tabulka 2. Metoda rozšířeného plošného zdroje (EDPS)

Fyzikální hodnoty	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5
λ [W/m.K]	0,086	0,033	0,074	0.083	0,124
α [m ² .s]	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$2,04 \cdot 10^{-7}$	$2,43 \cdot 10^{-7}$
c_p [J/kg.K]	1150	2037	2371,8	1369,9	936,3
ρ [kg/m ³]	220	270	520	297	545

Tabulka 3. Referenční měření pomocí metody TPS

Fyzikální hodnoty	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3	Vzorek 4	Vzorek 5
λ [W/m.K]	0,083	0,035	0,072	0.086	0,135
α [m ² .s]	$3,25 \cdot 10^{-7}$	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$5,8 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,63 \cdot 10^{-7}$
c_p [J/kg.K]	1170	2047	2391,8	1375,9	946,3
ρ [kg/m ³]	220	270	520	297	545

Výsledky měření metodou EDPS jsou zaznamenány v tabulce 2. Jak je zřejmé z tabulky 2. největší tepelnou kapacitu a nejnižší teplotní vodivost má vzorek č. 2, který je složený z 2x fenolický prepreg PH840-300-42, 1x Airex T90.100 9 mm, 1x fenolický prepreg PH840-300-42 a vzorek č. 3, který je složený z 1x rohož 300 g/m², 1x Bidiagonální tkanina Saertex 980 g/m², 1x Airex T90.100 10 mm, 1x Bidiagonální tkanina Saertex 980 g/m² povrchová úprava gelcoat BUFA 250.

Následuje vzorek č. 4, který je složený z 2x fenolický prepreg PH840-300-42, 1x Corecork NL 10 10 mm, 1x fenolický prepreg PH840-300-42 a vzorek č. 1, který je složený z 2x fenolický prepreg PH840-300-42, 1x voština Cormaster C2-3,2-48 9 mm, 1x fenolický prepreg PH840-300-42.

Nejmenší tepelnou kapacitu má vzorek č. 5, který je složený z 1x rohož 300 g/m², 1x Bigiagonálná tkanina Saertex 980 g/m², 1x Corecork NL 10 10 mm, 1x Bigiagonálná tkanina Saertex 980 g/m² povrchová úprava gelcoat NGA Hx3 RAL 9010.

Vzorky byly měřeny i metodou TPS. Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 3. Soulad naměřených hodnot metodou EDPS a TPS je excelentní.

4.4 Závěr

Závěrem zhodnotíme splnění cílů této bakalářské práce, tak jak byly určeny v zadání. Byla sestavena literární rešerše z různých českým i zahraničním zdrojů. Ve druhé části byly analyzovány tepelné vlastností materiálů. V závěrečné části jsou uvedeny a zhodnoceny výsledky měření měrné tepelné kapacity, teplotní a tepelné vodivosti pro 5 různých vzorků sendvičů, které byly dodány z firmy FORM s.r.o.

Jak je zřejmé z tabulky 2. největší tepelnou kapacitu a nejnižší teplotní vodivost mají vzorky č. 2 a č. 3. Také hodnoty tepelné vodivosti jsou poměrně nízké, z čehož vyplývá, že jde o velmi dobré tepelné izolanty porovnatelné se skelnou vatou.

Nejmenší měrnou tepelnou kapacitu má vzorek č. 5, který má i největší tepelnou vodivost. Teplotní vodivosti a tepelné vodivosti vzorků č. 1, 4 jsou srovnatelné.

Měření tepelných parametrů bylo verifikováno i nezávislou TPS metodou. Soulad výsledků EDPS a TPS je excelentní.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] - GAY, Daniel. *Composite materials: design and applications*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor, 2015]. ISBN 978-146-6584-877.
- [2] - BAREŠ, Richard. *Kompozitní materiály*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
- [3] - *KOMPOZITY: Definice a historie kompozitů* [online]. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: <http://mujweb.cz/zkorinek/>
- [4] - PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
- [5] - *Glass fiber* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Glass_fiber
- [6] - *ARMIL CFS* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://armilcfs.com/refractory-products/ceramic-fiber/>
- [7] - *Properties and Applications of Ceramic Composites Containing Silicon Carbide Whiskers* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/15091.pdf>
- [8] - *Nautic EXPO: Gurit* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.nauticexpo.com/prod/gurit/product-27794-229520.html>
- [9] - *Ústav materiálového inženýrství* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://umi.fs.cvut.cz>
- [10] - *Composites HAVEL* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.havel-composites.com/clanky/0-/74-Vseobecny-a-zakladny-popismaterialov-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitov.html>
- [11] - *Prepreg technologie* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://www.form-composite.com/prepreg>

[12] - STRONG, A. Brent. *Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications*. 2nd ed. Dearborn, Mich.: Society of Manufacturing Engineers, c2008. ISBN 978-087-2638-549.

[13] - *Laminated Structures* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: http://avstop.com/ac/Aviation_Maintenance_Technician_Handbook_General/5-34.html

[14] - *Foldcore Sandwich Structures and Their Impact Behaviour* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/278719000_Foldcore_Sandwich_Structures_and_Their_Impact_Behaviour_An_Overview

[15] - MACHÁČKOVÁ, Adéla. *Sdílení tepla a proudění: učební text*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2576-2.

[16] - *Tepelná vodivost* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_vodivost

[17] - *Molární tepelná kapacita* [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Mol%C3%A1rn%C3%AD_tepeln%C3%A1_kapacita